بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده برق

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق–کنترل

طراحی کنترل‌کننده سیستمهای عملیات از راه دور دوسویه در شرایط نامشخص

نگارش:

فاطمه سعیدی

استاد راهنما:

آقای دکتر احمد افشار

زمستان ۱۳۸۶

بسمه تعالی

شماره:

تاریخ :

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

فرم اطلاعات پایان نامه
کارشناسی ارشد و دکترا

۱-مشخصات دانشجو

نام و نام خانوادگی: فاطمه سعیدی دانشجوی آزاد × بورسیه ☐ دل ☐

شماره دانشجویی : ۸۴۱۲۳۰۵۸ دانشکده : مهندسی برق رشته تحصیلی : مهندسی برق کنترل

نام و نام خانوادگی استاد راهنما : آقای دکتر احمد افشار

عنوان به فارسی : طراحی کنترل کننده سیستمهای عملیات از راه دور دوسویه در شرایط نامشخص

عنوان به انگلیسی : Design of Controller for Bilateral Teleoperation under Uncertain Conditions

نوع پروژه: کاربردی × بنیادی ☐ توسعه ای ☐ نظری ☐

تاریخ شروع : ۸۴/۷/۱ **تاریخ خاتمه : ۸۶/۱۱/۱۷** **تعداد واحد : ۳۲**

سازمان تأمین کننده اعتبار :

واژه های کلید به فارسی : رویگر کالمن، حس حضور در محیط، شناسایی محیط، فیدبک نیرو، پایداری

واژه های کلیدی به انگلیسی : Kalman filter, Telepresence, Stiffness estimation, Force feedback, Stability

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت های پژوهشی دانشگاه :

استاد راهنما :

دانشجو : ارتباط نزدیکتر با صنعت در هماهنگی بیشتر صنعت و دانشگاه و انجام پروژه های مورد نیاز توسط دانشجویان

امضاء استاد راهنما : **تاریخ :**

نسخه ۱ : معاونت پژوهشی

نسخه ۲ : کتابخانه و به انضام دو جلد پایان نامه به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

تقدیم به همسر مهربانم

تشکر و قدردانی

خداوند متعال را شکرگزارم که توفیق تحصیل علم را به من عطا فرمود.
از استاد محترم جناب آقای دکتر احمد افشار که در تمام مراحل تحقیق و تهیه این رساله همواره با صبر و بردباری راهنما و مشوق اینجانب بوده اند نیز کمال سپاسگزاری را دارم.

چکیده

با پیشرفت‌های روزافزون در زمینه رباتیک و عملیات از راه دور، نیاز به سیستم‌هایی با قابلیت تماس با محیط‌های مختلف و ناشناخته بیشتر احساس می‌شود. لازمه کار در چنین شرایطی استفاده از الگوریتم‌های کنترلی پیشرفته و دقت در انتخاب مدل و سنسورها و طراحی کنترل‌کننده مناسب می‌باشد.

یک سیستم عملیات از راه دور شامل دو ربات فرمانده و فرمانبر است که از طریق یک شبکه کامپیوتری با یکدیگر در ارتباط می‌باشند. در بسیاری از کارهای انجام شده در زمینه کنترل این سیستم‌ها، تأکید بر عمل در فضای آزاد یا تماس با یک نوع خاص محیط از نظر نرمی یا سختی بوده است. در این رساله هدف، طراحی کنترل‌کننده‌ای با قابلیت کار در تمام این شرایط می‌باشد. بدین منظور از کنترل نیروی محلی در سمت فرمانبر استفاده شده که از یک رؤیتگر فعال به همراه یک فیدبک حالت تشکیل می‌شود. یک نیروی مجازی متناسب با اختلاف موقعیت‌های دو ربات، جایگزین فیدبک نیروی اندازه‌گیری شده در حلقه کنترل فرمانده می‌شود. جهت ایجاد قابلیت کار ربات در محیط‌های مختلف و ناشناخته، روش حداقل مربعات بازگشتی اصلاح شده به عنوان روشی جدید جهت شناسایی محیط مورد تماس مورد استفاده قرار گرفته است. یکی دیگر از موارد بررسی شده تأخیر زمانی در سیگنال‌ها مابین ربات‌های فرمانده و فرمانبر می‌باشد که در آن حد مجاز پارامترهای سیستم برای حفظ پایداری در قبال مقادیر مختلف به دست آمده است.

کلید واژه: رؤیتگر کالمن، حس حضور در محیط، شناسایی محیط، فیدبک نیرو ، پایداری.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... د
فهرست جدول‌ها ..... ه
فهرست شکل‌ها ..... و

فصل ۱- مقدمه ۱
۱-۱- معرفی سیستمهای عملیات از راه دور ۱
۱-۲- بررسی کارهای قبلی ۳
۱-۳- مروری بر پژوهش فعلی و ویژگیهای آن ۷
۱-۳-۱- مدلسازی ۸
۱-۳-۲- انتخاب روش و ساختار کنترلی ۸
۱-۳-۳- کنترل نیروی تماسی ۹
۱-۳-۴- شناسایی محیط به روش RLS اصلاح شده ۱۰
۱-۳-۵- تأخیر زمانی ۱۱
۱-۴- ساختار رساله ۱۱

فصل ۲- انواع معماری سیستمهای دوسویه و کاربردهای آن ۱۳
۲-۱- معماری چهارکاناله ۱۳
۲-۲- معماری دوکاناله ۱۴
۲-۲-۱- نمایش موقعیت - نیرو (فیدبک مستقیم نیرو) ۱۴
۲-۲-۲- ساختار موقعیت-موقعیت ۱۵
۲-۲-۳- معماری موقعیت- نیرو براساس خطای موقعیت ۱۵
۲-۲-۴- معماری نیرو – نیرو ۱۶
۲-۲-۵- معماری نیرو-موقعیت ۱۶
۲-۳- کاربردهای کنترل دوسویه ۱۶
۲-۳-۱- حمل مواد خطرناک ۱۷
۲-۳-۲- کاربرد در پزشکی ۱۷
۲-۳-۳- جراحیهایی با کمترین آسیبهای جانبی ۱۸
۲-۳-۴- جراحی از راه دور ۱۸
۲-۳-۵- رباتهای زیر آب ۱۹
۲-۳-۶- رباتهای فضایی ۱۹
۲-۳-۷- رباتهای گروهی متحرک ۲۰
۲-۳-۸- انجام کارهای بسیار ظریف و مونتاژکردن ۲۱

۲-۳-۹- دیگر کاربردهای مهم ۲۱
۲-۳-۱۰- دستکشهای هپتیک ۲۱
فصل ۳- مدلسازی بخشهای مختلف سیستم عملیات از راه دور دوسویه ۲۲
۳-۱- مدلسازی سیستم برای کار در محیطهای نرم ۲۲
۳-۱-۱- روش بیان معادلات به صورت هیبرید ۲۲
۳-۲- مدلسازی سیستم برای کار در محیطهای متغیر ۲۵
۳-۲-۱- مدل بخش فرمانده ۲۵
۳-۲-۲- مدل ربات فرمانبر ۲۵
۳-۲-۳- مفهوم فضای عملیاتی و معادلات دینامیکی یک بازوی ربات در این فضا ۲۶
۱. فضای مفاصل ربات: ۲۶
۲. فضای عملیاتی: ۲۶
۳-۲-۴- روش خطی سازی با فیدبک ۲۹
۳-۲-۵- انتخاب مدل محیط تماس ۳۱
۳-۲-۶- انتخاب مدل برای کانال ارتباطی ۳۱
فصل ۴- طراحی سیستم کنترل ۳۳
۴-۱- طراحی کنترل کننده برای سیستم BTO در محیطهای نرم ۳۳
۴-۱-۱- پایداری ۳۶
قضیه پایداری: [۱۶] ۳۶
۴-۲- طراحی کنترل کننده سیستم BTO برای کار در محیطهای متغیر ۳۷
۴-۲-۱- کلیاتی درباره کنترل نیروی تماسی ۳۸
۴-۲-۲- طراحی کنترل‌کننده نیرو ۴۰
۱. گسسته سازی سیستم ۴۱
۲. رؤیتگر فعال ۴۴
۳. توضیحی درباره ماتریسهای خطا ۴۹
۴. جایابی قطب توسط فیدبک حالت ۵۰
۴-۲-۳- طراحی سیستم BTO با فیدبک نیرو ۵۱
۴-۲-۴- ملاحظات طراحی ۵۲
۱. شفافیت ۵۲
۲. پایداری ۵۴
۴-۲-۵- بررسی تاثیرتأخیر زمانی کم و زیاد ۵۶
فصل ۵- شناسایی سختی محیط به روش RLS اصلاح شده و تطبیق پارامترها ۶۰
۵-۱- لزوم استفاده از شناسایی محیط در سیستم طراحی شده برای محیطهای نرم ۶۰
۵-۲- لزوم استفاده از شناسایی محیط در سیستم طراحی شده برای محیطهای متغیر ۶۰
۵-۳- روش شناسایی RLS ۶۱
۵-۳-۱- الگوریتم RLS ۶۲

۵-۳-۲- الگوریتم RLS اصلاح شده در شرایط تغییر پارامترها ۶۳
۵-۴- تطبیق پارامترها با تغییرات محیط در سیستم طراحی شده برای کار در محیطهای متغیر ۶۵
فصل ۶- شبیه سازی و بررسی نتایج ۶۷
۶-۱- شبیه‌سازی سیستم طراحی‌شده برای محیطهای نرم ۶۷
۶-۱-۱- شناسایی به روش RLS ۶۸
۶-۱-۲- تعیین مرز پایداری ۷۱
۶-۲- شبیه سازی سیستم طراحی شده برای محیطهای متغیر ۷۴
۶-۳- کنترل‌کننده نیرو در سمت فرمانبر ۷۵
۶-۳-۱- شبیه سازی سیستم فرمانده-فرمانبر ۷۹
۶-۳-۲- اعمال الگوریتم RLS اصلاحی و تطبیق پارامترها ۸۳
۶-۳-۳- بررسی تاثیر تأخیر زمانی. ۸۷
فصل ۷- نتیجه گیری ۹۱
فهرست مراجع ۹۳

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
عملیات از راه دور دوسویه	BTO
حداقل مربعات بازگشتی	RLS
حس حضور در محیط از راه دور	Telepresence
شفافیت	Transparency

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۶-۱ –مقادیر پارامترهای سیستم مورد استفاده در شبیه سازی ۷۵
جدول ۶-۲– مقادیر مجاز بهره‌های کنترلی در شرایط تأخیر انتقال زیاد و $k_s=1000N/m$ ۸۸
جدول ۶-۳– مقادیر مجاز بهره‌های کنترلی در شرایط تأخیر انتقال زیاد و $k_s=2000N/m$ ۸۸
جدول ۶-۴– مقادیر مجاز بهره‌های کنترلی در شرایط تأخیر انتقال زیاد و $k_s=5000N/m$ ۸۹
جدول ۶-۵– مقادیر مجاز بهره‌های کنترلی در شرایط تأخیر انتقال زیاد و $k_s=6000N/m$ ۸۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱- نمای مکانیکی سیستم کنترل دوطرفه..... ۱۳
شکل ۲-۲- نمایی از یک سیستم کنترل دوسویه چهارکاناله [۱۸]..... ۱۴
شکل ۲-۳-ساختار فیدبک نیروی مستقیم ۱۵
شکل ۲-۴- ساختار موقعیت-موقعیت برای کنترل دوطرفه [۲۴]..... ۱۵
شکل ۲-۵- معماری موقعیت نیرو بر اساس خطای موقعیت [۲۴].....۱۶
شکل ۲-۶- نمونه عملی از یک سیستم فرمانده-فرمانبر [۲۴]..... ۱۷
شکل ۲-۷- ربات جراحی داوینچی [۲۴]..... ۱۷
شکل ۲-۸- قسمت انتهایی ربات داوینچی با ۷ درجه آزادی با دقت بالا [۲۴]..... ۱۸
شکل ۲-۹- ساختار کلی یک سیستم جراحی از راه دور..... ۱۹
شکل ۲-۱۰- رباتهای زیر آبی [۲۴]..... ۱۹
شکل ۲-۱۱- نمایی از یک ربات فضایی جهت کمک به فضانوردان [۲۴]..... ۲۰
شکل ۲-۱۲-نمایش کنترل چندین ربات توسط یک ربات فرمانده با استفاده از کنترل دوسویه [۷]..... ۲۰
شکل ۲-۱۳- دستکشهای هپتیک با فیدبک نیرو با نامهای روتگرز و سایبرگرسپ [۳۲]..... ۲۱
شکل ۳-۱- ساختار شبکه دوقطبی برای یک سیستم BTO [۳۳]..... ۲۳
شکل ۳-۲- فیدبک نیرو بر اساس ضریبی از خطای موقعیت در ساختار دوقطبی [۳۳]..... ۲۳
شکل ۳-۳ -مدل دو قطبی ورودی-خروجی به همراه پارامترهای هیبرید سیستم عملیات از راه دور [۱۶]
..... ۲۴
شکل ۳-۴- مدلسازی محیط مورد تماس به صورت یک فنر [۱۹]..... ۳۱
شکل ۳-۵-سیستم عملیات از راه دور به وسیله فنر مجازی و کنترل نیرو. نیروی دلخواه f_d به وسیله فنر مجازی بر اساس تفاوت موقعیت مکانی رباتهای فرمانده و فرمانبر ایجاد می‌گردد. کنترل‌کننده موجود در سمت فرمانبر f_c را مجبور به دنبال کردن f_dمی‌کند و از طرفیf_d به اپراتور سمت فرمانده منتقل می‌شود. [۱۹]..... ۳۲
شکل ۴-۱- معماری موقعیت- نیرو در ساختار دوقطبی ۳۴
شکل ۴-۲-سیستم حلقه بسته با نایقینی ضرب شونده [۱۶].....۳۶
شکل ۴-۳- ساختار محل برخورد در انتهای ربات فرمانبر [۱۹]..... ۳۹
شکل ۴-۴- اصلاحات انجام گرفته توسط فیدبک. X_i نمایش فرمان موقعیت و X_o موقعیت خروجی.. ۴۲

شکل ۴-۵- رؤیتگر کالمن- $\hat{p}_k$ برای جبرانسازی خطای $e_{r,k}$ بوده و L_r بهره فیدبک حالت می‌باشد.[۲۰] ۴۶
شکل ۴-۶- نمایی از سیستم عملیات از راه دور. $G_{se}(s)$ تابع تبدیل ربات فرمانبر، رؤیتگر کالمن و محیط تماس و $G_{mp}(s)$ تابع تبدیل ربات فرمانده به همراه بازوی کاربر می‌باشد. [۱۹] ۵۱
شکل ۴-۷- نمودار مکان ریشه سیستم حلقه بسته با در نظر گرفتن تأخیر فرمان در $k_s=2000N/m$ و $\beta_f\beta_p=0.2$ ۵۵
شکل ۴-۸- بلوک دیاگرام سیستم *BTO*. در این شکل ضرایب مقیاس نیرو و موقعیت مشخص نشده‌اند. [۱۹] ۵۶
شکل ۴-۹-بلوک دیاگرام سیستم BTO به همراه تأخیرزمانی کانال ارتباطی [۱۹] ۵۶
شکل ۵-۱- به روز کردن K_{vir} بر اساس تخمین K_s [۱۹] ۶۶
شکل ۶-۱-شبیه سازی محیط نرم در نرم افزار MATLAB ۶۸
شکل ۶-۲- شناسایی سختی محیط بر اساس تکرار الگوریتم ۶۹
شکل ۶-۳- شبیه سازی محیط متغیر در نرم افزار *MATLAB* ۶۹
شکل ۶-۴- شناسایی محیط به روش *RLS* برای تغییرات محیط به صورت پله ۷۰
شکل ۶-۵- خطای تخمین سختی محیط به تغییر به صورت مربعی از روش RLS ۷۰
شکل ۶-۶- شناسایی محیط به روش RLS برای تغییرات محیط به صورت سینوسی ۷۱
شکل ۶-۷- خطای تخمین سختی محیط به تغییر به صورت سینوسی از روش RLS ۷۱
شکل ۶-۸- نمودارهای بد دامنه مربوط به نایقینی $W\Delta$ با تغییر پارامترها جهت تعیین مرز پایداری ۷۳
شکل ۶-۹- تغییرات g بر اساس تغییرات b_m [۱۶] ۷۳
شکل ۶-۱۰- معیار قابلیت اطمینان بر اساس تغییرات پارامتر bm [۱۶] ۷۴
شکل ۶-۱۱- کنترل‌کننده PID برای محیط با سختی k_s=2000 N/m ۷۶
شکل ۶-۱۲- مقایسه نیروی دلخواه و تماسی با استفاده از کنترلر PID در k_s=2000 N/m ۷۶
شکل ۶-۱۳- اعمال کالمن فیلتر و فیدبک حالت روی ربات فرمانبر در k_s=2000 N/m ۷۶
شکل ۶-۱۴- نیروی دلخواه و تماسی با استفاده از روش رؤیتگر کالمن در k_s=2000 N/m ۷۷
شکل ۶-۱۵- نیروی تماسی تخمین زده شده توسط کالمن فیلتر ۷۷
شکل ۶-۱۶- نیروهای تماسی در حالتی که کنترل‌کننده به روش کالمن فیلتر برای سختی محیط $k_s=5000N/m$ طراحی شده و در محیطهای مختلف به کار می رود. ۷۸
شکل ۶-۱۷- نیروهای تماسی در حالتی که کنترل‌کننده PID برای سختی محیط $k_s=5000N/m$ طراحی شده و در محیطهای مختلف به کار می رود. ۷۸

شکل ۶-۱۸- بررسی کنترلر با کالمن فیلتر با حذف حالت اضافی در شرایط طراحی سیستم برای $ks=5000N/m$ و کار در محیطهای مختلف..... ۷۹
شکل ۶-۱۹ بلوک دیاگرام Simulink سیستم عملیات از راه دور..... ۸۰
شکل ۶-۲۰- تغییرات نیرو و جابجایی برای$ks=100\ N/m$..... ۸۱
شکل ۶-۲۱- تغییرات نیرو و جابجایی برای$ks=300\ N/m$..... ۸۱
شکل ۶-۲۲- تغییرات نیرو و جابجایی برای$ks=1000\ N/m$..... ۸۱
شکل ۶-۲۳- تغییرات نیرو و جابجایی برای$ks=3000\ N/m$..... ۸۲
شکل ۶-۲۴ – تغییرات نیرو و جابجایی برای$۶ks=6000\ N/m$..... ۸۲
شکل ۶-۲۵–بلوک دیاگرام سیستم به همراه شناساگر RLS و تطبیق مقدار k_{vir}..... ۸۴
شکل ۶-۲۶- به کارگیری الگوریتم شناساییRLS اصلاح شده درشرایط تغییر پارامتر در سیستم طراحی شده برای محیطهای متغیر در حین کار سیستم..... ۸۴
شکل ۶-۲۷- پاسخ موقعیتهای فرمانده و فرمانبر در شرایط تغییر محیط..... ۸۵
شکل ۶-۲۸- نیروهای مطلوب و تماسی در شرایط تغییر محیط..... ۸۵
شکل ۶-۲۹- پاسخ موقعیتهای فرمانده و فرمانبر در شرایط تغییر محیط با افزایش ضریب میرایی سمت فرمانده..... ۸۶
شکل ۶-۳۰- نیروهای مطلوب و تماسی در شرایط تغییر محیط محیط با افزایش ضریب میرایی سمت فرمانده..... ۸۶
شکل ۶-۳۱- مقدار تخمین زده شده سختی محیط از روش تجربی[۱۹]..... ۸۷
شکل ۶-۳۲- نیروهای مطلوب و اندازه‌گیری شده در حضور تأخیر زمانی محیط انتقال به اندازه ۰/۰۰۲ ثانیه و $ks=6000N/m$..... ۸۷
شکل ۶-۳۳- موقعیتهای رباتهای فرمانده و فرمانبر در حضور تأخیر زمانی محیط انتقال به اندازه ۰/۰۰۲ ثانیه و $ks=6000N/m$..... ۸۸
شکل ۶-۳۴- نیروهای مطلوب و اندازه‌گیری شده در حضور تأخیر زمانی محیط انتقال به اندازه ۰/۱ ثانیه و $ks=6000N/m$..... ۹۰
شکل ۶-۳۵- موقعیتهای رباتهای فرمانده و فرمانبر در حضور تأخیر زمانی محیط انتقال به اندازه ۰/۱ ثانیه و $ks=6000N/m$..... ۹۰

فصل ۱– مقدمه

با افزایش تحقیقات در زمینه رباتیک و پیشرفتهای حاصله در طراحی و کنترل رباتها، کاربردهای آنها نیز رو به افزایش است. یکی از زمینه‌های مرتبط و بسیار فعال، مبحث عملیات از راه دور در این رباتها می‌باشد که فعالیتهای تحقیقاتی فراوانی را طی چند سال اخیر به خود اختصاص داده است. در این فصل به ارائه مباحث کلی و مفاهیم اولیه این سیستمها پرداخته می‌شود.

۱-۱– معرفی سیستمهای عملیات از راه دور

به طور کلی می‌توان گفت که یک سیستم عملیات از راه دور[1] یا TO از پنج بخش تشکیل می‌شود. دو بخش اول آن رباتهای فرمانده[2] و فرمانبر[3] می‌باشند. بخش سوم کاربر[4] بوده که فرمان مورد نظر خود را از طریق اعمال نیرو به ربات فرمانده وارد می‌کند و در حالت کلی ربات فرمانبر باید از ربات فرمانده پیروی کند. ربات فرمانبر ممکن است در شرایط فضای آزاد یا در تماس با یک محیط که بخش چهارم سیستم را تشکیل می‌دهد، عمل کند. ارتباط دو بخش فرمانده و فرمانبر را یک کانال ارتباطی[5] برقرار می‌سازد که آخرین بخش سیستم TO را تشکیل می‌دهد. به عبارت دیگر این کانال ارتباطی یک شبکه کامپیوتری می‌باشد که در حالت کلان شبکه جهانی اینترنت را نیز شامل می‌شود. رباتهای فرمانده و فرمانبر می‌توانند هر دو در یک محیط و با فاصله کمی از یکدیگر و یا کیلومترها فاصله به کار گرفته شوند.

در مورد سیستمهای TO، اصطلاحاتی وجود دارد که به منظور تفکیک دقیق آنها و پرهیز از اشتباهات بعدی در ادامه به تعریف آنها پرداخته می‌شود.

---

[1] Teleoperation
[2] Master
[3] Slave
[4] Operator
[5] Communication channel

۱. *عملیات از راه دور*: این واژه به معنی کار کردن با یک سیستم از محلی دور می‌باشد. به عنوان مثال کنترل یک شیر یا کنترل رباتهای تصویربردار مریخ که از زمین کنترل می‌شوند.

۲. *سیستم کنترل دوسویه*[1]: این واژه به معنی کنترل یک سیستم مکانیکی کوپل شده با محیط (فرمانبر) به وسیله سیستم مکانیکی کوپل شده با اپراتور (فرمانده) می‌باشد. بخش فرمانده با استفاده از احساس نیرویی که از محیط سمت فرمانبر دارد، اقدام به کنترل آن می‌کند. این دو بخش لزوما از هم دور نیستند در نتیجه کنترل دوسویه می‌تواند بدون سیستم عملیات از راه دور نیز به کار رود. به بیانی دیگر دوسویه بودن به معنای "دو طرفه بودن" می‌باشد [۱]. در روباتیک کنترل دو طرفه زمانی به‌کار می‌رود که دو سیستم به وسیله "نیرو" و/یا "موقعیت مکانی" نسبت به هم در ارتباط باشند.

۳. *Haptic*: این واژه معمولا در مورد حس لامسه به کار گرفته می شود. در بیشتر سیستمهای دوسویه قسمت فرمانده دارای توانایی haptic است و حس نیرو و/یا لامسه را به کاربر منتقل می‌کند. ارتباطهای haptic لزوما با کنترل دوسویه همراه نیستند؛ مانند برخی از بازی‌ها یا اعمال جراحی مجازی.

سیستمهایی که در این رساله به آنها پرداخته می‌شود به طور کلی سیستمهای عملیات از راه دور دوسویه[2] یا BTO می‌باشند.

سیستمهای BTO ممکن است بر اساس کاربرد، در شرایط متفاوتی مانند فضای آزاد، تماس با محیطهای نرم، سخت و یا ترکیبی از تمام این موارد به‌کار گرفته شوند. قدم اول در طراحی یک سیستم BTO مدلسازی بخشهای مختلف آن است. پس از آن، انتخاب یک ساختار کنترلی متناسب با کاربرد سیستم و در مرحله آخر، تنظیم بهره های کنترلی بر اساس اهداف طراحی را باید مورد توجه قرار داد. دوعامل مهمی که باید در طراحی سیستمهای BTO مد نظر قرار گیرند پایداری و کارایی[3] سیستم می‌باشند.

در هر سیستم کنترلی اولین و مهمترین هدف طراحی، حفظ پایداری است. این مسئله را می‌توان از روشهای معمول مانند مکان ریشه، معیار نایکوئیست، نمودار بود[4] و حد فاز و بهره و حتی در صورت نیاز روشهای پیچیده‌تر مانند معیار پایداری مقاوم، مورد بررسی قرار داد. مسئله پایداری برای سیستمهای

[1] Bilateral Control
[2] Bilateral Teleoperation
[3] Performance
[4] Bode plot

BTO به‌خصوص در شرایط تماس با محیطهای سخت و یا وجود تأخیر زمانی در محیط انتقال بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

عامل مهم بعدی همانطور که اشاره شد، کارایی سیستم است که می‌تواند به صورت داشتن قابلیت ردیابی[1] مناسب در شرایط کار در فضای آزاد و داشتن شفافیت[2] در شرایط تماس که حس حضور در محل[3] را به دنبال دارد، تعبیرشود [۲]. شفافیت به مفهوم معادل و یکسان بودن پاسخ فرمانده و فرمانبر به نیرو و موقعیت مکانی محیط پیرامون می‌باشد. به بیان دیگر اگر محیط تماس معادل با یک امپدانس فرض شود، این حس زمانی وجود دارد که امپدانس منتقل شده به کاربر برابر با امپدانس واقعی محیط مورد تماس باشد. در مرجع [۳] این واژه به‌عنوان "اتصال حسی[4]" تعبیر شده است.

طراحی سیستمهای BTO به طور کلی موضوع پیچیده‌ای است که به علت کاربردهای زیاد که در فصل بعد به آنها اشاره می‌شود، بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. تحقیقات و آزمایشات عملی بسیاری در زمینه کاربردهای مختلف این سیستمها انجام شده که هر کدام با در نظر گرفتن فرضیاتی، سعی در پرداختن به یک یا چند مسئله موجود را داشته‌اند. در بخش بعد در نگاهی اجمالی به کارهای انجام شده در گذشته می‌پردازیم.

۱-۲- بررسی کارهای قبلی

در آغاز نیاز به سیستمهای کنترل دوسویه برای مواردی همانند آزمایشگاههای رادیواکتیو و اعمال جراحی حساس احساس شد که فیدبک تصویری[5] ناکافی به نظر می‌رسید. اولین سیستم مکانیکی فرمانده–فرمانبر توسط آقای ری گورتز[6] در سال ۱۹۴۹ جهت آزمایشگاه رادیو اکتیو اختراع گردید[٤] . عبارت فرمانده–فرمانبر از سیستم مکانیکی و فیلد الکتریکی که او جهت کار خود استفاده کرده بود گرفته شده است[٥]. این مکانیسم به وسیله موتورهای سِروُ الکتریک با فیدبک نیرو در سال ۱۹۵۰ اجرا شد. از آن به بعد کارهای بسیار زیادی در این زمینه توسط محققان صورت گرفته است. در مرجع[٦] مطالعه مفیدی در سال ۱۹۸۹ در این زمینه موجود است. از جدیدترین مطالعات مربوط به تاریخچه کارهای انجام شده در زمینه سیستمهایBTO، مقاله آقایان هکایم[7]واسپانگ[8] می‌باشد[۷] . تحقیقات در زمینه

[1] Tracking
[2] transparency
[3] telepresence
[4] Kinesthetic Coupling
[5] Visual Feedback
[6] Ray Goertz
[7] Hokayem
8 Spong

سیستمهای BTO منجر به پیشرفتهای بسیاری در زمینه‌های دیگر تحقیقاتی همانند پایداری تماسی[۱]، تأخیر در ارتباطات[۲]، سیستمهای توزیع شده[۳] و حقیقت مجازی[٤] گردیده است.

یکی از مسائل مهم و مورد توجه در سیستمهایBTO، بروز مشکلات ناشی از اختلال کانال ارتباطی اعم از تجهیزات شبکه و نرم افزارها می‌باشد که شامل مواردی از قبیل تأخیر زمانی با مقادیر مختلف و غیر قابل پیش بینی و از بین رفتن قسمتی از داده‌ها در مسیر انتقال می‌شود. مهمترین این موارد، تأخیر زمانی است که ممکن بر اساس نوع کانال ارتباطی مورد استفاده، ثابت یا متغیر و کوچک یا بزرگ بوده و می‌تواند باعث ناپایداری سیستم شود. برای حذف ناپایداری ناچار به اعمال محدویتهایی برای سیستم هستیم که کاهش کارایی را به دنبال دارد.

طراحی سیستم در حضور تأخیر زمانی محیط انتقال از اوایل دهه۶۰ بسیار مورد توجه محققان قرار گرفت و روشهای متعددی برای مقابله با تاثیرات نامطلوب آن پیشنهاد شد. در [۸] استفاده از سیستمهای پیش‌بین برای کنترل امپدانسی برای یک سیستم BTO با تأخیر پیشنهاد شده‌است. در این روش تأخیر شبکه اندازه گیری شده در هر لحظه به کنترل کننده اعمال می‌شود. دو سیستم پیش بین در دو سمت فرمانده و فرمانبر قرار داده شده‌است . کنترل‌کننده می‌تواند از سیگنالهای تخمین زده شده توسط این پیش‌بین‌ها به همراه سیگنالهای اندازه‌گیری شده تأخیردار استفاده کند. در این روش اطلاعات سیستم مانند مدل کاربر، اندازه لحظه به لحظه تأخیر زمانی و مدل امپدانسی محیط، دانسته فرض شده است.

در [۹] نیز یک کنترل کننده امپدانس برای سیستم BTO همراه با تأخیر زمانی ثابت طراحی شده‌است. در این روش برای کاربر انسانی و محیط انجام کار، مدل امپدانسی در نظر گرفته شده و به علت وجود نایقینی در این مدلها، کنترل کننده مد لغزشی به کار گرفته شده‌است. مدل قسمتهای فرمانده و فرمانبر به‌صورت جرم و فنر در نظر گرفته شده‌اند. این سیستم بطور عملی با مقاومت خوبی کار کرده اما به‌علت استفاده از کنترل کننده مد لغزشی، مشکل پدیده لرزش هنوز وجود دارد.

در[۱۰] طراحی سیستم TO بر پایه غیر فعال بودن[٥] انجام شده که این سیستم از قانون حفظ انرژی[٦] تبعیت می‌کند. به این علت که با وجود تأخیر زمانی استفاده از تبدیل لاپلاس مشکل است، با معرفی متغیر موج[۷] درک بهتر و عمیقتری از دینامیک انتقالهای تحت تأخیر زمانی حاصل شده‌است.

---

[1] Contact Stability
[2] Commiunication Delay
[3] Distributed System
[4] Virtual Reality
[5] passivity
[6] enrgy conservation
[7] Wave variable

در[۱۱] یک سیستم بلادرنگ[1] با فیدبک نیرو پیشنهاد شده که بدون هیچ فرض محدود کننده‌ای برای تأخیر و با بیان معادلات سیستم بدون حضور زمان[2]، سیستم را کنترل کرده‌است. همچنین از فیدبک ویدئویی نیز در این سیستم استفاده شده‌است.

در [۱۲] نیز بدون در نظر گرفتن هیچ محدودیتی روی تأخیر زمانی، سیستمی با معادلات بدون حضور زمان در نظر گرفته شده و با کمک گرفتن از دو بخش تنظیم کننده فرمان[3] و تنظیم کننده بهره کنترل کننده[4] ربات که با استفاده از پارامترهای کیفیت شبکه یا همان QoS کار می‌کنند، کارایی و کیفیت سیستم بهبود یافته است.

در [۱۳] برای مقابله با تصادفی[5] بودن تأخیر زمانی در بسیاری از شبکه‌ها مانند اینترنت، یک سیستم عملیات از راه دور همراه با تنظیم کننده تأخیر[6] مطرح شده است که باعث تبدیل تأخیرهای نامنظم موجود، به یک تأخیر ثابت و مشخص در سیستم می‌شود. اما در این روش زمان نمونه برداری توسط خود سیستم و با توجه به مقدار متوسط تأخیر شبکه تعیین می‌شود که این امر در برخی کاربردهای دقیق مطلوب نبوده و ممکن است کاهش کارایی سیستم را به دنبال داشته باشد.

همانطور که اشاره شد سیستمهای BTO ممکن است در شرایط متفاوتی مانند فضای آزاد، تماس با محیطهای نرم و یا سخت به کار گرفته شوند. در ابتدا بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه تعقیب موقعیت در فضای آزاد بود اما بعدها به‌علت کاربردهای عملی، لزوم بررسی حرکتهای در تماس با محیط و مسائل مربوط به آنها در سیستمهای BTO احساس شد. در حالت تماس ربات فرمانبر با یک محیط، علاوه بر موقعیت رباتها، نیروی وارد شده در نقطه تماس نیز در کنترل سیستم حائز اهمیت است.

بیشتر افرادی که در این زمینه کار کرده‌اند بدنبال یک ساختار ایده آل بودند. مثلا یوکوکوجی[7] یک پاسخ ایده آل را به صورتی تعریف کرد که در آن هدف سیستم کنترل طراحی شده، تطابق مکان و نیروی دو بخش فرمانده و فرمانبر بود [۳]. لاورنس[8] پارامتر "حس حضور در محل" را بعنوان نسبت بین امپدانس منتقل شده و امپدانس واقعی محیط مطرح کرد و هدف طراحی او رساندن این ضریب به ۱ یا نزدیک آن در ماکزیمم پهنای باند کنترل بود [۲۱]. این دو کار نتایج تقریبا مشابهی نشان دادند. اما نکته

[1] real-time
[2] Event based
[3] Command negotiator
[4] Controller gain adjustment
[5] random
[6] Delay regulator
[7] Yokokohji
[8] Lawrence

کلیدی در هر دو مورد ضمانت دستیابی به نتایج مطلوب درکابردهای متصور بر اساس شاخصهای پایه طراحی می‌باشد.

در[١٤] نشان داده شده که "حس حضور در محل" را نمی‌توان به صورت کامل و ایده‌ال اجرا کرد. در نتیجه باید امکان ایجاد این خاصیت تا حداکثر ممکن فراهم شود. با استفاده از این مفهوم یعنی رسیدن به حس حضور در محل به صورت بهینه، در [١٥] یک "معیار قابلیت اعتماد[1]" به عنوان شاخص بهینگی به صورت ضریبی از نسبت تغییرات امپدانس منتقل شده به کاربر به تغییرات واقعی محیط، تعریف می‌شود. سپس این تابع با توجه به قید پایداری و تعقیب موقعیت بهینه می‌شود. همچنین با فرض اینکه در امپدانس کاربر و محیط تماس نایقینی وجود دارد، از معیار پایداری مقاوم برای تعیین قید پایداری استفاده شده است. در [١٦] نیز از روش مشابه برای طراحی سیستم استفاده شده با این تفاوت که شاخص قابلیت اعتماد ساده‌تر و به‌صورت ضریبی از تفاوت امپدانس منتقل شده به کاربر و امپدانس محیط تماس در نظر گرفته شده و نایقینی تنها در مورد امپدانس محیط تماس لحاظ شده‌است. این روش برای کاربرد در محیطهای نرم مورد بررسی قرار گرفته است.

در برخی از کارهای انجام شده نیز کار با محیطهای سخت و هدف حفظ پایداری سیستم در طراحی مورد نظر قرار گرفته است [١٧]. اما حالت کلی این مساله سیستمی است که در شرایط محیطی مختلف کار کند که در این مورد باید موارد خاص دیگری علاوه بر مسائل ذکر شده، مورد توجه قرار گیرند. در این شرایط با توجه به نامشخص بودن محیط در ابتدا باید مکانیزمی برای شناسایی آن در نظر گرفته شده و سپس بهره های کنترلی و یا حتی ساختار کنترل‌کننده با تغییر محیط تطبیق پیدا کنند. در این زمینه کارهای معدودی صورت گرفته است از جمله [١٨] که در آن از یک ساختار سوئیچینگ با چند مدل استفاده شده که در شرایط مختلف محیط به کنترل کننده مناسب سوئیچ می‌کند. در حقیقت چند مدل محدود به عنوان پیش فرض در نظر گرفته شده که هر کدام از آنها با یک ضریب وزنی در تنظیم کنترل کننده نقش دارند و این ضرایب وزنی با تغییر محیط تغییر پیدا می‌کنند. در [١٩] نیز درباره سیستمهای BTO در شرایط کار در انواع محیطها و استفاده از رؤیتگر فعال[2] در طراحی سیستم کنترل، مطالعات و آزمایشات عملی انجام شده که در بخش بعد بطور خلاصه و در فصلهای آینده به تفصیل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

[1] Fidelity measure
[2] Active Observer (AOB)